

УДК 630\*383:625.07:[622.363.2'17:622.361.1]

**Е. В. Лаевская, Е. В. Воробьева, Ю. В. Матрунчик, Т. В. Захаренко**

Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ ГЛИНОСОДЕРЖАЩИХ  
ОТХОДОВ КАЛИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА В РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ  
ТЕХНОЛОГИЯХ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА**

В данной работе исследованы структурно-механические и реологические свойства нового материала, который образуется из жидких глиносодержащих отходов калийного производства после их флокуляции, фильтрации и отделения жидкой солевой фазы и содержит 75–80% глины, 20–25% солей и 0,1–0,2% полимерного флокулянта. Сравнение с глинистой дисперсией аналогичного состава, не обработанной флокулянтном и без фильтрации, показало, что усилие сдвига и предел ползучести нового материала выше в 1,25–1,30 раза, а степень уплотнения выше в 1,05 и 1,15 раза при ускорении 100 и 600 м/с<sup>2</sup> соответственно. Это обусловлено тем, что модифицированные полимером частицы глины выступают в роли связки между кристаллическими сростками солей. В свою очередь, соль, которая выкристаллизовывается в местах контактов глины, скрепляет частицы глины. Полученные данные позволяют рекомендовать новый материал в технологиях лесного комплекса для устройства противопожарных барьеров лесным пожарам, насыпей и слоев оснований в конструкциях лесных автомобильных дорог.

**Ключевые слова:** лесная дорога, новый глинистый материал, переработка отходов, усилие сдвига, предел ползучести, уплотнение, утилизация отходов.

**E. V. Layeuskaya, E. V. Vorobieva, Yu. V. Matrunchik, T. V. Zakharenko**The Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy  
of Sciences of Belarus**USE OF CLAY CONTAINING WASTES OF POTASH PRODUCTION  
IN RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES OF FOREST COMPLEX**

In the present paper we studied the structural, mechanical and rheological properties of the new material, which is formed of clay-containing liquid wastes of potash production after their flocculation, filtration and separation of the liquid phase (salt solution); product contains 75–80 % of clay, 20–25 % salts and 0.1–0.2 % polymer flocculant. Comparison of the studied product with the clay dispersion of similar composition but not treated with flocculant and not filtered showed that the shear stress and creep strength of the new material is 1.25–1.30 times higher, and compaction degree is 1.05 and 1.15 times higher at the acceleration 100 and 600 m/s<sup>2</sup>, respectively. This is because the polymer-modified clay particles act as a binder between the intergrown crystalline salts. In turn, the salt which crystallises in sites of contacts between clay particles, binds the clay particles. The data obtained allow us to recommend the use of new material for technologies of the forest complex for construction of fire barriers against wildfire, sediment layers and bases for the forest roads.

**Key words:** forest road, new clay material, recycling, shear stress, creep stress, compaction, waste recycling.

**Введение.** Леса – один из важнейших природных ресурсов Республики Беларусь. Лесной фонд Беларуси насчитывает более 9,4 млн. га, лесистость территории – 38,8%. Запас древесины оценивается в 1,6 млрд. кубометров, а ежегодный прирост составляет 30,3 млн. В Беларуси одновременно с увеличением общей площади лесного фонда наблюдается и устойчивый рост площадей посадок. За двадцатилетний период площадь спелых древостоев увеличилась более чем в два раза. Объем заготовки древесины организациями Минлесхоза при проведении рубок главного пользования увеличился в 2,2 раза с 2010 по 2015 г. Рациональное использование лесных ресурсов требует создания развитой инфраструкту-

ры, в частности создания сети лесных автодорог. В настоящее время в ведении учреждений Минлесхоза находится 1389 километров лесохозяйственных дорог. Из этого объема дорог 79,8% (1108 километров) требуют ремонта, в том числе 474 километра – текущего, 634 километра – капитального. Для эффективного ведения лесного хозяйства густота дорог должна составлять 0,432 километра на 100 гектаров. Сейчас она составляет в среднем 0,257. Это значит, что для достижения оптимальной ситуации необходимо построить около 12 тысяч километров. Следует также учитывать, что для вывозки каждые 10 тысяч кубометров древесины требуется построить дополнительно один километр дороги [1, 2].

Одним из существенных факторов, ограничивающих развитие сети лесных автомобильных дорог, является высокая стоимость строительства и ремонта дорожного полотна. На возведение одного километра автомобильной дороги требуются десятки тысяч тонн грунта, щебня, песка, причем материалы для строительства конструкций лесных дорог должны иметь повышенную плотность и способность противостоять внешним воздействиям как в сухом, так и во влажном состоянии, что обеспечивается оптимальной смесью (принцип плотной смеси) песчаных, пылеватых и глинистых частиц (30, 50 и 20%, соответственно) [3]. Устройство одежды лесовозных дорог является наиболее материалоемким и дорогостоящим процессом в их строительстве, что сказывается на себестоимости лесопroduкции.

Рост интенсивности движения и нагрузок от транспорта на лесных автомобильных дорогах требует более строгого подхода к обеспечению долговечности и несущей способности дорожных конструкций. Увеличение капиталоемкости объектов повышает значимость и требования к ресурсному обеспечению: при увеличении толщины конструкций дорожных одежд в 1,4–1,6 раза потребность в таких материальных ресурсах, как песок, щебень, каменные глинистые материалы, возрастает на 50–60% [4].

Одним из основных путей повышения эффективности использования производственных ресурсов с учетом повышения объемов их потребления и стоимости является увеличение применения отходов и вторичных ресурсов производства и улучшение эксплуатационных качеств материалов для строительства конструкций лесных дорог. В сложившихся условиях дефицит дорожно-строительных материалов можно снизить за счет применения в дорожных конструкциях вторичных ресурсов – отходов промышленности, которые можно использовать или в качестве непосредственно дорожно-строительного материала, или как продукт для его получения.

Перспективным вариантом снижения стоимости строительства лесных автомобильных дорог является использование при обустройстве дорог крупнотоннажных глиносодержащих отходов калийного производства – глинисто-солевых шламов. В связи с тем, что глинистую составляющую руды отделяют на начальных стадиях процесса обогащения, до обработки флотационными, гидрофобизирующими и антислеживающими реагентами (аминами, парафинами, ферроцианидами и др.), в шламах отсутствуют токсичные химические вещества. Этот продукт правильнее отнести не к отходам производства, а к природным ресурсам, при-

годным для использования. Однако непосредственное применение жидких глиносодержащих отходов калийного производства практически невозможно в связи с их полужидкой формой (суспензия) и высокой концентрацией солей (хлоридов калия и натрия) в жидкой фазе. Глинисто-солевые шламы не находят применения и направляются на складирование в шламохранилища, суммарная площадь которых составляет 1113 га, а объем накопленных шламов – 93,9 млн. т [5].

Сотрудниками Института общей и неорганической химии НАН Беларуси разработана и внедрена на ОАО «Беларуськалий» новая комплексная технология переработки глиносодержащих отходов калийного производства. Разработанная новая комплексная технология позволяет выделить из суспензии солевой раствор, который возвращается в технологический процесс обогащения руды. После отделения солевого раствора остается продукт, представляющий собой однородную пластичную массу с влажностью 28–30%. Содержание в продукте глины (по сухому веществу) 75–80%, солей 20–25%. Продукт также содержит 0,1–0,2% полимера, введенного в суспензию для ее фазового разделения. Несмотря на низкие концентрации, полимер (полиакриламид, широко применяемый в мировой практике для очистки воды, в том числе питьевой) модифицирует глину и оказывает существенное влияние на структуру и свойства материала. Данный продукт, полученный после отделения солевого раствора, сертифицирован как «Продукт глинистый минерализованный, ПГМ», ТУ ВУ 600122610.003-2015 и предлагается для устройства противофильтрационных экранов на полигонах захоронения твердых коммунальных отходов, противопожарных барьеров лесным пожарам, насыпей и слоев оснований в конструкциях лесных автомобильных дорог.

В связи с тем, что ПГМ является новым материалом, содержащим глинистые и кристаллические солевые частицы, представляет интерес исследовать его структурно-механические и реологические свойства с учетом рекомендаций специалистов по оценке свойств материалов различной природы, используемых при строительстве инженерных сооружений [6–8], для оптимизации параметров использования нового материала в технологиях строительства конструкций лесных дорог.

**Основная часть.** В работе применяли смеси глины и соли ( $KCl : NaCl = 1 : 1,2$ ) со следующими соотношениями глинистой и солевой составляющих (по сухому веществу): 8 : 1; 5 : 1; 3 : 1; 2 : 1; 1 : 1; 1 : 2,5; 1 : 4; 1 : 5; 1 : 6; 1 : 7; 1 : 8. В качестве глины использовали отмытые

от растворимых солей глинистые отходы калийного производства. Смеси тщательно перемешивали. В работе использован также образец ПГМ, полученный по технологии фильтрации после отделения солевого раствора. Соотношение глины и соли в нем 3 : 1, отличаем от других образцов является присутствие полимера и способ получения (флокуляция полимером и отжим на фильтр-прессе). Влажность образцов 28%. С использованием специальной лабораторной установки измеряли предел ползучести системы, характеризующий ее пластичность, а также фиксировали усилие сдвига, при котором наступало разрушение образца [8].

Показатель сжимаемости образцов определяли с использованием центрифуги. Исследуемый образец подвергали действию центробежных сил, интенсивность которых регулировали скоростью вращения барабана. Распределение нагрузки и напряжения в модельном образце идентично действию гравитационных сил. Сравнительный анализ способности материала к уплотнению и поведения материала в поле действия центробежных сил позволило смоделировать процессы уплотнения тех же материалов в статических условиях под действием нагрузки, а также взаимодействие в исследуемых системах. В наших экспериментах образцы одинаковой массы загружали в цилиндрические формы и уплотняли в центрифуге при увеличении центростремительного ускорения, согласно условиям, указанным в табл. 1. Для каждого из образцов проводили не менее пяти параллельных опытов, результаты опытов усредняли. Степень уплотнения образцов рассчитывали как отношение высоты столба материала образца после уплотнения к высоте до уплотнения.

В табл. 2 приведены структурно-реологические характеристики (усилие сдвига, предел ползучести и показатель сжимаемости) для образцов с различным содержанием глины и соли. Образцы, полученные смешиванием глины и соли, без полимера характеризуются незначительным изменением предела ползучести в интервале соотношений глины к соли (5–1) : 1.

Таблица 1

**Условия экспериментов по уплотнению образцов под действием центробежной силы**

Обороты центрифуги, об/мин	Время уплотнения, мин	Центростремительное ускорение, м/с <sup>2</sup>	Высота столба материала, отн. ед.
700	5	100	5
1000	5	200	10
1200	10	300	15
1400	10	400	20
1600	15	500	25
1800	15	600	30

Усилие сдвига максимально в интервале соотношений глины и соли (3–1) : 1. С увеличением содержания глины в смеси усилие сдвига и предел ползучести уменьшаются. Это происходит, вероятно, вследствие того, что глина при увеличении ее содержания в смеси выполняет функцию «смазки» по плоскости скольжения и, тем самым, облегчает процесс деформирования материала. Усилие сдвига ПГМ выше в 1,3 раза, предел ползучести ПГМ – в 1,25 раза по сравнению со смесью в аналогичном соотношении глины и соли (3 : 1). Частицы глины в ПГМ, модифицированные полимером, выступают в роли связки между кристаллическими сростками солей. В свою очередь, соль, которая выкристаллизовывается в местах контактов глины, скрепляет частицы глины. Глина и соль в смеси, взаимно действуя как «шипы», упрочняют структуру, и усилие сдвига, необходимое для разрушения структуры, увеличивается.

Степень уплотнения смесей при низких нагрузках на систему практически не зависит от соотношения глины и соли (табл. 2). С уменьшением содержания глинистого компонента степень уплотнения возрастает и в интервале соотношений глины и соли (3–8) : 1 практически не меняется. Значения степени уплотнения образцов с различным соотношением глины и соли мало отличаются при минимальной и максимальной нагрузке, что свидетельствует о равномерном уплотнении материала на начальной стадии.

Таблица 2

**Структурно-реологические характеристики образцов**

Показатели	Соотношение глина : соль (мас.)										
	8 : 1	5 : 1	3 : 1	3 : 1 ПГМ	1 : 1	1 : 2	1 : 4	1 : 5	1 : 6	1 : 7	1 : 8
Усилие сдвига, Н	7,2	9,4	10,2	13,5	11,2	11,7	11,5	10,7	10,5	10,2	10,8
Предел ползучести, Н	5,9	7,6	7,5	9,4	7,2	6,1	5,5	5,1	4,4	4,2	3,9
Степень уплотнения, % при ускорении, м/с <sup>2</sup> :											
100	46,0	54,1	60,5	63,4	63,2	64,5	64,4	65,3	65,6	66,1	66,3
600	44,2	52,1	57,9	65,2	58,4	58,8	59,2	59,9	60,2	61,2	60,9

Степень уплотнения ПГМ выше по сравнению со смесью при соотношении глины и соли (3 : 1), особенно при максимальной нагрузке на систему. В этом случае степень уплотнения возрастает в 1,3 раза, что обусловлено равномерным распределением глинистых и кристаллических частиц. Чем эффективнее идет уплотнение в начальный интервал времени, тем прочнее будет система после высыхания и испарения влаги. Кроме того, плотно сжатый образец оказывает повышенное сопротивление сдвигу.

**Заключение.** Исследованы структурно-механические и реологические свойства нового продукта, представляющего собой пере-

работанный отход калийного производства, который образуется после отделения солевого раствора в процессе фильтрации глинисто-солевых шламов. Показано, что усилие сдвига, предел ползучести и степень уплотнения нового продукта выше по сравнению с глинисто-солевой дисперсией, не обработанной флокулянтom и без фильтрации. Полученные данные позволяют рекомендовать новый продукт переработки глиносодержащих отходов калийного производства в технологиях лесного комплекса для устройства противопожарных барьеров лесным пожарам, насыпей и слоев оснований в конструкциях лесных автомобильных дорог.

### Литература

1. Государственная программа развития лесного хозяйства Республики Беларусь на 2011–2015 годы: постановление Совета Министров Респ. Беларусь № 1626: утв. 03 нояб. 2010 г. // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. 2010, № 265, 5/32798.
2. Ларионов В. Я., Левушкин Д. М. Строительство дорог – решение транспортной доступности лесных массивов // Лесопромышленник. 2010. № 4. С. 22–27.
3. Сускин Ю. А., Кувалдин Б. И. Строительство лесовозных дорог и искусственных сооружений. М.: Лесная промышленность, 1979. 320 с.
4. Методы, модели и алгоритмы повышения транспортно-эксплуатационных качеств лесных автомобильных дорог в процессе проектирования, строительства и эксплуатации / А. В. Скрыпников [и др.]. М.: ФЛИНТА, 2013. 312 с.
5. Лысухо Н. А., Ерошина Д. М. Отходы производства и потребления, их влияние на природную среду. Минск: МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2011. 210 с.
6. Денисов Н. Я. О природе деформаций глинистых пород. М.: Минречфлот СССР, 1951. 200 с.
7. Республиканские строительные нормы. Инженерные изыскания для строительства. Производство лабораторных исследований физико-механических свойств грунтов: РСН 51-84. М.: Государственный комитет РСФСР по делам строительства, 1985. 39 с.
8. Чаповский Е. Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. М.: Недра, 1975. 304 с.

### References

1. Gosudarstvennaja programma razvitiya lesnogo hozjajstva Respubliki Belarus' na 2011–2015 gody [State Program for Development of Forestry of Belarus for 2011–2015]: postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus' N 1626, utv. 03 nojab. 2010 g. Nac. Reestr pravovyh aktov Resp. Belarus'. 2010, no. 265, 5/32798 (In Russian).
2. Larionov V. Ja., Levushkin D. M. Road Construction – solution for woodlands transport accessibility. *Lesopromyshlennik* [Lumberer], 2010, no. 4, pp. 22–27 (In Russian).
3. Suskin J. A., Kuvaldin B. I. *Stroitel'stvo lesovoznyh dorog i iskusstvennyh sooruzhenij* [Construction of forest roads and artificial constructions]. Moscow, Lesnaja promyshlennost' Publ., 1979. 320 p.
4. Skrypnikov A.V., Skvorcova T. V., Kondrashova E. V., Vakulin A. I., Logachev V. N. *Metody, modeli i algoritmy povyshenija transportno-jekspluatacionnyh kachestv lesnyh avtomobil'nyh dorog v processe proektirovanija, stroitel'stva i jekspluatacii* [Methods, models and algorithms improve transport and performance of forest roads in the design, construction and operation]. Moscow, FLINTA Publ., 2013. 312 p.
5. Lysuho N. A., Eroshina D. M. *Othody proizvodstva i potreblenija, ih vlijanie na prirodnuju sredu* [Waste production and consumption and their impact on the environment]. Minsk, MGEU im. A. D. Saхарova Publ., 2011. 210 p.
6. Denisov N. Ja. *O prirode deformacij glinistyh porod* [On the nature of clay rock deformation]. Moscow, Minrechflot SSSR Publ., 1951. 200 p.
7. RSN 51-84. *Respublikanske stroitel'nye normy. Inzhenernye izyskanija dlja stroitel'stva. Proizvodstvo laboratornyh issledovanij fiziko-mehaničeskikh svojstv gruntov* [Republican building codes. Engineering survey for construction. Production of laboratory tests of physical and mechanical properties

of soils]: RSN 51-84. Moscow, Gosudarstvennyj komitet RSFSR po delam stroitel'stva, 1985. 39 p. (In Russian).

8. Chapovskij E. G. *Laboratornye raboty po gruntovedeniju i mehanike gruntov* [Laboratory work on soil science and soil mechanics]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 304 p.

### Информация об авторах

**Лаевская Елена Васильевна** – научный сотрудник лаборатории полимерсодержащих дисперсных систем. Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси (220072, г. Минск, ул. Сурганова 9/1, Республика Беларусь). E-mail: layeuskaya@gmail.com

**Воробьёва Елена Викторовна** – доктор химических наук, доцент, заведующая лабораторией полимерсодержащих дисперсных систем. Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси (220072, г. Минск, ул. Сурганова 9/1, Республика Беларусь). E-mail: evorobieva@igic.bas-net.by

**Матрунчик Юлия Владимировна** – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории полимерсодержащих дисперсных систем. Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси (220072, г. Минск, ул. Сурганова 9/1, Республика Беларусь). E-mail: Yuliya.M@tut.by

**Захаренко Татьяна Викторовна** – научный сотрудник лаборатории полимерсодержащих дисперсных систем. Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси (220072, г. Минск, ул. Сурганова 9/1, Республика Беларусь). E-mail: Zakharenko.t@gmail.com

### Information about the authors

**Layeuskaya Elena Vasilevna** – researcher of the Laboratory of Polymer-Containing Disperse Systems. The Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganova str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: layeuskaya@gmail.com

**Vorobieva Elena Viktorovna** – DSc (Chemistry), Assistant Professor, Head of the Laboratory of Polymer-Containing Disperse Systems. The Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganova str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: evorobieva@igic.bas-net.by

**Matrunchik Yuliya Vladimirovna** – PhD (Chemistry), Senior Researcher of the Laboratory of Polymer-Containing Disperse Systems. The Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Yuliya.M@tut.by

**Zakharenko Tatyana Viktorovna** – researcher of the Laboratory of Polymer-Containing Disperse Systems. The Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganova str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Zakharenko.t@gmail.com

Поступила 12.02.2016